

アーチの地震時加速度応答分布特性と静的地震力に関する研究

著者	鄭 讃 愚
号	3449
発行年	2004
URL	http://hdl.handle.net/10097/8721

氏 名	鄭 讃 愚
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 17 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 都市・建築学専攻
学 位 論 文 題 目	アーチの地震時加速度応答分布特性と静的地震力に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 山田 大彦
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 山田 大彦 東北大学教授 井上 範夫 東北大学教授 植松 康

論文内容要旨

アーチは、大空間構造の主構造要素としてしばしば用いられている。大屋根を支持するアーチに単独で用いられる場合、幾つも平行あるいは交差して用いられる場合がある。また、アーチ状のユニットを桁行(長手)方向に数多く連結し、筒形屋根を構築する方法もある。更に、筒形シェルあるいはそれに似た構造などで桁行方向に十分長い場合、安全側であるとの判定から、両端の拘束効果を見捨ててアーチと考えることがある。このように、事実的にあるいは仮定のもとでアーチと見なされる構造は多様である。規模についても、スパンにして10m程度から100mを超えるものまであって、多様である。以下では、これらの構造ないし構造要素を総称してアーチと呼ぶ。

アーチの構造設計に際して考慮すべき荷重には、自重、積載荷重、積雪荷重、風荷重、地震力などがある。アーチの変位、応力、固有振動数、座屈耐力などに関する既往の研究は、古く、極めて多い。しかし、建築の構造設計の視点からすると、地震力のみならず他の荷重条件についても直接適用可能な資料は極わずかである。

アーチのみならずシェル・空間構造の地震力に関する従来の規定には、動的応答解析を要求される超高層建物を除けば、普通の建物を対象として層せん断力を設定する方法以外にはないし、上下方向地震力に対する設計の方針は示されていない。現状では、建築基準法施行令に基づいて、 A_i 分布と C_0 から層せん断力を仮定する方法とか、 A_i 分布を用い $C_0=1$ として D_s 値を設定し層せん断力を仮定する方法などが多く用いられているが、これらの方法は、シェル・空間構造の地震応答特性を考えていない点で、根拠がない。近年、鉄骨造の大規模ドームが実現されるようになり、ようやく動的応答効果を考慮して静的地震力が設定され始めたが、このような手法は動的応答解析を必要とすることから、普及したとはいえない。

本論文では、以上のような現状を踏まえ、空間構造の基本的な振動特性を持つ最も簡単な構造であるアーチを対象とし、実地震波及び模擬地震波に対する瞬間加速度応答倍率特性を調べ、簡単で合理的な等価静的地震力の評価法を提案することを目的とする。

以下、本論文の構成と研究内容及び研究成果を述べる。

第1章 序論

本研究の背景と目的及び空間構造の耐震性能評価における本論文の位置付けを明らかにした。

第2章 一様断面アーチの振動特性

第2章では、1次固有振動数 f_1 が1.0~3.5Hzであり、見かけ上の細長比 λ が100、150、200である地上に建つ一様断面アーチを解析モデルとして用いた。

アーチの基礎式を無次元化し、ガラキン法を用いた固有値解析を行い、アーチの固有振動特性は、見かけ上の細長比 λ と開角 θ により決まることが分かった。更に無次元固有振動数 F_n の近似評価式を作成した。 F_n の近似評価式は、見かけ上の細長比 λ と開角 θ により適用範囲は異なるが、低次ほどまた開角が大きくなるほど有効範囲は広がる特徴と持っている。また、有限要素法でも固有値解析を行い、異なる解析法による解の妥当性を検定した。

行い、異なる解析法による解の妥当性を検定した。

振動応答の変化に起因する入力地震動のスペクトル特性を示し、各地震動のスペクトル特性による応答の変化を予測できるが、本論文では、アーチの形状に応じた大局的な特性に注目し、等価静的地震力の設定を試みた。瞬間加速度応答分布を抽出するにあたり、加速度応答の判断時刻を判定する条件として変位ベクトル最大時、絶対加速度応答最大時、縁応力最大時及び入力方向反力最大時の4種類を適用した。その結果、判断条件による瞬間加速度応答の違いは小さく、無視できることが分かった。加速度応答倍率分布の特性については、分布形および応答の最大値の観点で考察した。水平地震入力による水平・鉛直応答及び上下地震入力による水平応答の分布形はそれぞれ概ね同じ傾向を示すが、上下地震入力による鉛直応答の分布形については2種類の相違なる特徴的な分布があり、一樣断面アーチについて、最大の加速度応答に注目すれば、分布のモデル化とその定量的な表現が可能であることが分かった。

等価静的地震力の考え方および設定における仮定について述べた。また、震度分布関数および等価静的地震力を設定し、震度分布関数と瞬間加速度応答倍率分布との対応関係について考察した。等価静的地震力分布モデルについては、できるだけ簡明な表現を目指しているため、パラメータとした1次固有振動数および開角について若干の誤差を有するものの、概ねよい結果が得られた。

第3章 変断面アーチの振動特性

大空間構造としてアーチを用いる場合、アーチ構造の力の伝達特性から、アーチの中央部に比べ両端部の剛性を高くする変断面アーチがしばしば用いられること、また、変断面アーチは、断面の分布形により様々なケースがあり、振動特性も様々であることから、本章では、断面積 A 、断面2次モーメント I 、単位長さあたり重量 ρ をそれぞれ同じルールで変化されるモデルと断面積 A 、単位長さあたり重量 ρ を一定とし、断面2次モーメント I のみ変化させるモデルの2種類の変断面アーチを設定した。一樣断面アーチとの比較を行うため、各変化量の平均値が一樣断面アーチの値と同じくなるように変化量の変化ルールを設定し、変断面アーチの単位長さあたり重量の平均値 ρ_0 を調整することにより一樣断面アーチと変断面アーチの1次固有振動数が一致するように設定した。また、変断面アーチの短部の値に対する中央の値の比が $3/4$ 及び $1/2$ となる2つのケースを設定した。一樣断面アーチの基本寸法と形状及び瞬間加速度応答分布を抽出するにあたり、加速度応答の判断時刻を判定する条件は第2章と同じにした。

一樣断面アーチと変断面アーチの瞬間加速度応答倍率応答は、その分布形及び応答の最大値において概ね同じ応答を示した。また、変断面アーチの短部の値に対する中央の値の比が応答に及ぼす影響はほとんどないことが分かった。断面積、断面二次モーメント及び単位長さ当たりの質量の平均値が等しく、一次固有振動数が等しい変断面アーチと一樣断面アーチとは、概ね同じ瞬間加速度応答倍率分布を持ち、一樣断面アーチで設定した等価静的地震力は、変断面アーチについても同じく適用できることが分かった。

第4章 地震動の同時入力による加速度応答分布特性

上下地震動は水平地震動に対して構造物に与える影響が小さいと見なされ、一般構造物の耐震設定においては水平地震動のみを考慮するのが一般的であるが、第2章で示したように空間構造は、水平地震動により水平方向だけではなく上下方向にも構造物が励起されるし、また、上下地震動により上下方向だけではなく水平方向にも構造物が励起される特徴を持っているため、水平・上下の両方の地震動を考慮する必要がある。

水平・上下地震動の同時入力時での水平方向の瞬間加速度応答倍率分布は、水平地震動の単独入力時での水平応答と上下地震動の単独入力時での水平応答を足した分布形をし、水平・上下地震動の同時入力時での鉛直方向の瞬間加速度応答倍率分布は、水平地震動の単独入力時での鉛直応答と上下地震動の単独入力時での鉛直応答を足した分布形をすることが分かった。また、開角が大きくなる場合(開角が 60° 以上)では、地震動の同時入力時の応答が最大になる時刻 T_{HV} と水平地震動の単独入力時の応答が最大になる時刻 T_H が一致する割合が大きくなり、開角が小さい場合(開角 30°)では、地震動の同時の入力時応答が最大になる時刻 T_{HV} と水平地震動の単独入力時の応答が最大になる時刻 T_H 及び上下地震動の単独入力時の応答が最大になる時刻 T_V がそれぞれ一致する場合と一致しない場合でほぼ同じ割合を示すことが分かった。

第3章では、第2章での水平・上下地震動の単独入力時の水平・上下等価静的地震力を用い、同時入力時での等価静的地震力を設定する仮定のもとで、加算による設定と二乗和の平均による設定の二通りの設定法を検討した。加算による方法は、瞬間加速度応答の最大値より、すべての1次固有振動数および角度で若干過大な評価となっており、二乗和の平均による方法は、概ね良い近似を示した。

第5章 空間構造の地震応答に及ぼす下部構造の影響

本章では、上部構造と下部構造をそれぞれ1質点系に置換し、連結した2質点系のモデルを用いて、水平入力時の上部構造に対する下部構造の影響を調べた。できるだけ簡単なモデルで本質的な性状を把握したいと考え、解析の手法にこだわらず、むしろ体験的にとらえることを試みた。上部構造の地震応答に及ぼす下部構造の影響について、1つの視点となればと期待している。以下に内容を要約する。

2質点せん断モデルを仮定すると、上部構造の固有周期を与え、上部構造に対する下部構造の質量比、周期比を設定し、減衰定数を仮定すると、地震応答解析が可能となる。ここでは、質量比および周期比の広い範囲で応答解析を実施し、下部構造の影響を考察した。応答倍率の評価は、上部構造が直接地震入力を受ける場合の応答を基準として行われた。減衰については、上部、下部それぞれの構造特性に応じて減衰定数を設定することが明快であると考えたが、ここではレーリー減衰を仮定した。その結果、質量比と周期比の空間で上部構造の応答が増幅される領域およびむしろ低減される領域が存在することを確かめることができた。また、変形と外力の対応を検討することができた。これにより、下部構造の影響評価に関する展望が1つ開けたように思われる。

第6章 下部構造を考慮したアーチの地震時加速度応答分布特性

本章では、第2章で用いた一様断面アーチを上部構造とし、これに下部構造を付いた場合を想定し、水平入力時の下部構造を考慮したアーチの地震時加速度応答分布特性を考察した。水平・鉛直加速度応答分布は、それぞれ対称分布・逆対称分布形を示し、高次の分布形を持つ応答はほとんど現れなかった。水平加速度応答最大値は開角が大きくなると単調に大きくなり、鉛直加速度応答最大値は開角が $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$ で最大値を示しており、第2章の下部構造がないアーチの応答特性と類似していることが分かった。また、質量比と周期比による地上に直接建設されたアーチの地震時加速度応答(第2章)に対する下部構造を考慮したアーチの加速度応答の増減は、2質点系モデルでの質量比と周期比による増減(第5章)と同じ増減特性を持っていることが分かった。下部構造を考慮したアーチの等価静的地震力を下部構造がないアーチの等価静的地震力(第2章)と2質点系モデルの質量比と周期比による増減率(第5章)を用いて設定することができた。

第7章 結論

本論文では、空間構造の基本的な振動特性を持つ最も簡単な構造であるアーチを対象として、地震入力面では、水平・上下動の単独入力と同時入力について、また、構造形式では、一様断面アーチ、変断面アーチ及び下部構造を考慮したアーチについて、系統的に瞬間加速度応答倍率分布特性を明らかにするとともに等価静的地震力を提案した。今後、空間構造の耐震設計技術の向上に役立つと期待される。

論文審査結果の要旨

大規模な体育館等の空間構造は、日常の利用目的以外に地震時の避難・防災拠点としても利用される可能性が高く、特に耐震性に配慮することが望まれている。シェル・空間構造の地震力に対する耐力を評価する際、地震動による慣性力を静的な地震力に置き換えて解析することが設計上しばしば行われているが、汎用性のある静的地震力は提案されていない。本論文は、空間構造の基本的な振動特性を持つ最も簡単な構造であるアーチを対象とし、実地震波及び模擬地震波に対する瞬間加速度応答倍率特性を系統的に明らかにし、できるだけ簡明な静的震度分布に置換することより、合理的な等価静的地震力の評価法を提案することを目的としたもので、全7章よりなっている。

第1章は序論である。

第2章では、地面に直接建つ一様断面アーチを対象とし、アーチの形状と断面特性を代表する開角と見かけの細長比を用いて固有振動特性を表現している。開角と見かけの細長比をパラメータとするアーチモデルを設定し、実地震波及び模擬地震波に対する瞬間加速度応答倍率分布特性を系統的に考察している。その結果、瞬間加速度応答倍率分布の分布形及び応答の最大値に注目すれば、分布のモデル化とその定量的な表現が可能であることを示している。また、瞬間加速度応答倍率分布特性に基づいた震度分布関数及び等価静的地震力を提案している。以上の新しい知見は、本論文の根底を成している。

第3章では、変断面アーチの振動特性について、変断面アーチの断面変化に対する適切なルールを設定して解析している。断面積、断面二次モーメント及び単位長さ当たりの質量の平均値が等しく、一次固有振動数が等しい変断面アーチと一様断面アーチとは、概ね同じ瞬間加速度応答倍率分布を持ち、一様断面アーチで設定した等価静的地震力は、変断面アーチについても同じく適用できることを明らかにしている。

第4章では、地震動の水平・上下同時入力による瞬間加速度応答倍率特性を考察し、同時入力における位相と相乗効果を検討している。第2章で求めた水平・上下各地震動の単独入力時での等価静的地震力を用い、同時入力時の等価静的地震力をうまく近似できることを示している。

第5章では、空間構造の地震応答に及ぼす下部構造の影響を考察するため、第一段階として上部構造と下部構造をそれぞれ独立に1質点系に置換し、連結した2質点系モデルを用いて、水平地震動入力時での上部構造に及ぼす下部構造の影響を考察している。上部と下部の質量比と周期比の座標空間を用い、上部構造の応答が増幅される領域、あるいは逆に低減される領域の存在を明らかにしている。

第6章では、一様断面アーチを上部構造に持つ場合について、水平入力時の下部構造を考慮したアーチの地震時加速度応答分布特性を考察している。下部構造を持つアーチの瞬間加速応答は、第5章で示した質量比と周期比の座標空間における上部構造の応答の増減特性を示すことを明らかにした。また、下部構造の加速度応答を引いた残りの水平応答は、第2章での地面に立つアーチの水平応答と似た傾向を示しており、第2章での等価静的地震力と第5章での質量比と周期比の空間での上部構造の応答の増減係数を用いて、下部構造を考慮したアーチの等価静的地震力の設定が可能であることを示している。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は、空間構造の基本的な振動特性を持つアーチを対象として、地震入力に対する瞬間加速度応答倍率分布特性を系統的に明らかにするとともにそれと等価な静的地震力を提案したもので、空間構造の耐震設計技術の向上に資するとともに建築構造学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。